

文章编号:1000-582X(2011)01-053-07

## 连铸二冷区喷嘴布置方式优化方法

靳 星,陈登福,龙木军,张 健,陈嫚丽

(重庆大学 材料科学与工程学院,重庆 400044)

**摘 要:**对现有连铸二冷区喷嘴布置进行分析,根据布置优化原则提出采用喷嘴水流密度数值叠加的方法,在拉坯方向和铸坯横断面方向上对喷嘴布置方式进行优化。其中,在铸坯横断面方向上,考虑了横向水流密度分布的不均匀性对铸坯凝固过程的影响,建立二维铸坯传热数学模型,仿真得到不同位置的铸坯断面凝固形貌,并比较了优化前后铸坯温度分布、凝固情况和铸坯质量。结果表明喷嘴布置方式优化后,二冷区铸坯在拉坯方向和断面方向上喷淋水区域内均匀冷却,周期性温度回升变小,表面温度能够均匀下降,保证了较好的铸坯内部质量。

**关键词:**连铸;二冷区;冷却水;水流密度;喷嘴布置方式

**中图分类号:**TF777.1

**文献标志码:**A

## An optimization method for the nozzle arrangement in secondary cooling zone of continuous casting

JIN Xing, CHEN Deng-fu, LONG Mu-jun, ZHANG Jian, CHEN Man-li

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** Based on the existing research on nozzle arrangement method in secondary cooling zone of continuous casting, the method of superposed water flow density is put forward to optimize the nozzle arrangement at casting direction and transverse section of slab according to the optimization principle. The two-dimension heat transfer model is established. The solidification morphology of cross-section at casting direction is simulated with consideration of the influence of water flow density inhomogeneity on solidification process at transversal section, and the temperature distribution of slab, solidification process, and quality of slab are compared between before and after optimization. The results indicate that the surface temperature of slab is dropped equably after optimization, and the casting blank is cooling uniformly in the water springing zone so as to ensure better quality of the casting blank.

**Key words:** continuous casting; secondary cooling zone; cooling water; water flow density; nozzle arrangement

连铸过程是将钢水连续冷却凝固最终形成铸坯的工艺过程。在液固相转换进行热交换的过程中,二次冷却(简称二冷)区的冷却凝固是铸坯凝固的中心环节,是铸坯离开结晶器后通过喷嘴进行水喷淋

(或气雾)冷却的这一区域,主要是控制铸坯表面温度在拉坯方向上均匀下降,最终使铸坯完全凝固。二冷强度和冷却均匀性直接影响着铸机的产量和铸坯的质量<sup>[1]</sup>。因此,对连铸二冷喷嘴布置方式进行

收稿日期:2010-08-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50674109)

作者简介:靳星(1981-),男,重庆大学博士研究生,主要从事连铸过程模拟优化研究。

陈登福(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65102467;(E-mail)chendfu@cqu.edu.cn。

优化有利于保证铸坯在一定范围内均匀冷却,对于保证良好的铸坯内部质量具有重要的实际意义。

目前铸机二冷喷嘴的布置方式大部分是根据喷嘴喷射角度和经验进行设计。严学春等<sup>[2]</sup>研究表明喷嘴布置方式应根据单个喷嘴水量分布特性进行组合,使组合得到的整体水量分布均匀。齐彦峰等<sup>[3]</sup>研究了喷嘴布置方式对板坯角裂的影响情况,通过调整喷嘴的布置方式有效地解决了角部横裂和三角区裂纹。乔兴武<sup>[4]</sup>等通过理论计算进行喷嘴的分布配置,并用理论计算值校正喷嘴的经验配置,防止偏离过大,得到某冷却段内水量的合理分布,从而改善连铸坯质量。Ramstorfer<sup>[5]</sup>等对气水喷嘴进行传热性能测试,并分析得到了不同工况下喷嘴喷射条件下的传热系数以及对于铸坯传热的影响。Richard等<sup>[6]</sup>建立了二维铸坯凝固传热模型,分析了拉速、冷却水量对于铸坯温度分布和凝固过程的影响,并根据传热模型提出了一种在线控制二冷水量的算法。二冷喷嘴布置对铸坯质量产生重要影响,但目前讨论喷嘴布置时往往侧重于拉坯方向的喷嘴布置,而忽略了铸坯横向的喷嘴布置情况。笔者采用喷嘴水流密度数值叠加的方法对喷嘴布置方式进行优化,分别考察了拉坯方向和铸坯断面横向的水流密度分布情况,仿真得到拉坯方向上不同位置横断面的铸坯凝固形貌,评价喷嘴布置间距是否合理,布置方式能否满足铸坯均匀冷却的需要。

## 1 实验方法

喷嘴测试采用重庆大学自主开发的 LZPZ-200 喷嘴水流密度和冲击压力测试仪<sup>[1]</sup>,主要测试喷嘴水流密度和冲击压力,其中水流密度为喷嘴喷射区域内单位面积单位时间上水量,即水流密度的表达式为  $w_i = (m_i - m_{i-1}) / \rho \cdot \tau \cdot S$ ,其中  $w_i$  为喷嘴喷射区域内某采集点的水流密度,  $L / (m^2 \cdot s)$ ;  $\rho$  为水的密度,  $g / L$ ;  $\tau$  为采集时间步长,  $s$ ;  $m_i$  为从测试起点到  $i$  采集点收集的总水量,  $g$ ;  $S$  为集水器敞口面积,  $m^2$ 。在优化喷嘴布置方式时,可以根据喷嘴布置的间距,将喷嘴水流密度进行数值叠加处理,检验在各种布置方式下,整体水量分布情况是否满足铸坯冷却的要求,为保证良好的铸坯质量提供了理论依据。

### 1.1 喷嘴布置方式优化原则

在连铸二冷段,二冷配水应该是冷却水量沿拉坯方向从上到下逐渐减少,但冷却水量在一定冷却区域内应保证均匀,控制铸坯在二冷区的表面温度均匀降低,防止表面及内部裂纹。理想状态是在铸

坯的断面方向上,除边角部位外,断面上各点喷水冷却量一样。但是由于喷嘴的喷射特性和单个喷嘴不能覆盖断面,断面上各处水量不可能保持完全相同。因此,要先根据钢种、连铸机的结构特性,确定好喷嘴类型,然后根据喷嘴水量分布特性进行组合,确定最佳的喷嘴布置方式尽量使组合得到的整体水量分布平整均匀。根据铸坯二冷段冷却需要,选取合适的喷嘴类型和布置方式进行冷却有助于提高冷却效率和保证良好的铸坯质量<sup>[7]</sup>。

在二冷区使用喷嘴类型确定的条件下,喷嘴布置方式优化应遵循以下原则:1) 在铸坯横断面方向,冷却强度大小均匀,即喷嘴的整体水流密度分布要尽可能均匀,由于铸坯角部为二维传热,角部的冷却强度通常小于中心部位;2) 在一定冷却区域范围内,沿拉坯方向上,整体水流密度分布尽可能大小均匀;3) 铸坯温度沿拉坯方向均匀下降,铸坯降温速度小于  $200 \text{ }^\circ\text{C} / \text{m}$ ,回温速度小于  $100 \text{ }^\circ\text{C} / \text{m}$ ;4) 由于一般铸机二冷喷嘴布置受到夹棍布置等条件制约,喷嘴布置方式的优化还应考虑到铸坯断面、铸机实际情况、支撑夹棍分布、冷却回路等因素。

图 1 为板坯和方坯在断面方向上喷嘴分布示意图。对于方坯,二冷区大多采用圆型水喷嘴或气水喷嘴,在横断面方向上一个喷嘴就能覆盖整个断面,冷却均匀性与喷嘴本身结构特性有关<sup>[8]</sup>;在拉坯方向上,采用间隔布置喷嘴的方法使水量能够覆盖整个铸坯,保证铸坯在一定范围内均匀冷却。对于板坯来说,在足辊段和二冷区零段,由于对铸坯冷却强度较大,一般采用水喷嘴,而在二冷一段至后面若干段,一般采用气水喷嘴。由于板坯横断面方向单个喷嘴的喷射范围有限,因此要采取多个喷嘴组合的方式对铸坯冷却布置多个喷嘴(如图 1 所示),并且要使相邻两喷嘴的喷水区有一定的重叠,以保证断面方向上均匀冷却,而如何布置喷嘴将直接影响铸坯冷却的效果。在横断面方向上,若采用圆型喷嘴,则需要若干个喷嘴,可以保证横断面方向上铸坯的均匀冷却;若采用扁平型喷嘴,喷射范围大,单个喷嘴即能满足断面宽度方向的冷却需要。在拉坯方向上,根据喷嘴在拉坯方向上的喷射范围对喷嘴进行布置优化,从而保证铸坯在拉坯方向上均匀冷却。在实际喷嘴测试过程中,大部分只把喷射长度方向的水流密度分布和喷射角作为测试的主要内容,忽略了喷嘴喷射宽度方向的测试。因此,对于板坯的喷嘴布置方式优化应从横断面方向和拉坯方向综合考虑。

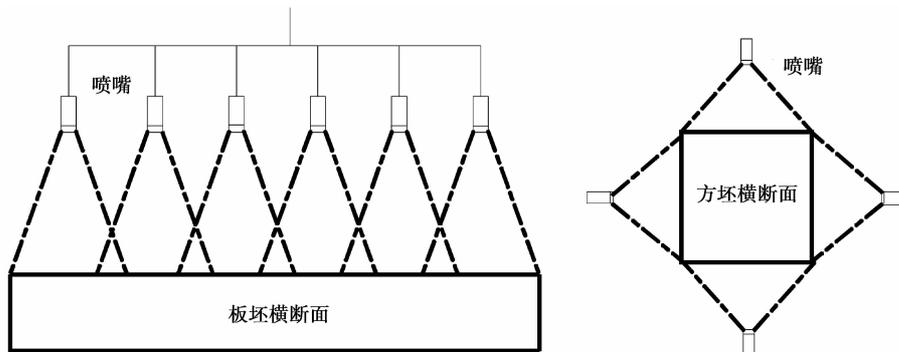
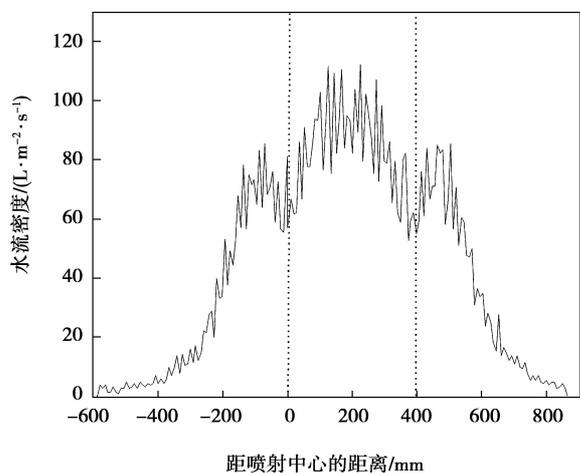


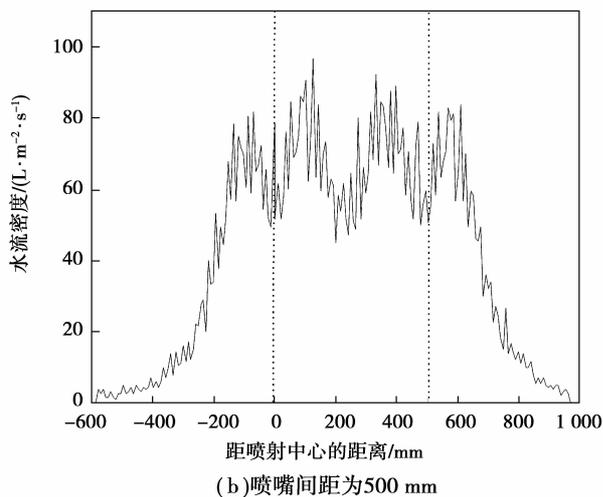
图 1 铸坯断面方向喷嘴分布示意图

### 1.2 优化方法

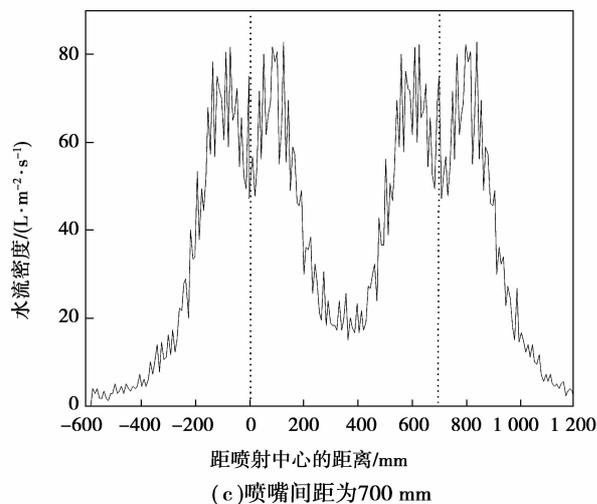
图 2 为某板坯连铸的两个气水喷嘴在工作条件下(水压 0.3 MPa、气压 0.2 MPa)的水流密度数值叠加的结果(虚线为喷嘴喷射区域的中心位置)。其中图 2(a)、(b)、(c)分别为喷嘴布置间距为 400、500、700 mm 时在喷射宽度方向上的水流密度分布情况。在图(a)布置方式中,两喷嘴中间位置的水流密度明显大于两侧,局部冷却强度过大;图(c)布置方式中,由于喷嘴间距过大,中间位置的水流密度较小,仍不利于铸坯的均匀冷却;在图(b)布置方式下,在有效喷射区域内水流密度分布比较均匀,在冷却过程中能够使铸坯均匀冷却。比较 3 种喷嘴布置方式,图(b)布置方式为工作条件下的最佳布置方式,能够保证在一定范围内铸坯均匀冷却,保证较好的铸坯内部质量。当喷嘴数目增多时,也可以利用同样的方法来评价和选择最佳的喷嘴布置方式。



(a)喷嘴间距为400 mm



(b)喷嘴间距为500 mm



(c)喷嘴间距为700 mm

图 2 不同布置方式下的喷嘴水流密度分布曲线

### 1.3 二冷凝固传热数学模型仿真验证

为了验证叠加方法对喷嘴布置间距优化的效果,采用切片法建立连铸二冷二维凝固传热数学模型对优化结果进行仿真计算,根据布置方式优化的基本准则确定优化结果是否合理<sup>[9]</sup>。建立连铸二冷

二维凝固传热数学模型,结合铸机实际情况设定传热边界条件<sup>[10-11]</sup>,传热量由式(1)-(4)给出,并根据实际情况对二冷各传热边界条件进行修正,对各喷嘴布置方式下铸坯表面温度进行仿真计算。通过仿真计算得到的铸坯表面温度是否均匀下降,是否达到二冷冶金准则要求,从而验证在一定工艺条件下喷嘴布置方式的优化效果。

结晶器冷却传热量:  $q_m = 2\ 527\ 760 - 337\ 184\sqrt{\tau}$ ; (1)

水喷淋区:  $q_s = n_0 \times T_w^{n_1} \omega^{n_2} (T_w - T_0)$ ; (2)

夹辊接触区:  $q_{rol} = 11\ 513.7 \times T_w^{-0.737} \times V^{-0.2} \times \alpha^{-0.17}$ ; (3)

辐射区和空冷段:  $q_r = \delta \cdot \epsilon \times (T_w^4 - T_0^4)$ 。 (4)

式中:  $\tau$  为铸坯某一断面在结晶器中的停留时间, s;  $h$  为喷淋水与铸坯表面间的传热系数,  $J/(m^2 \cdot s \cdot ^\circ C)$ ;  $T_w$  为铸坯表面温度,  $^\circ C$ ;  $W$  为平均水流密度,  $L/(s \cdot m^2)$ ;  $n_0, n_1, n_2$  均为常数;  $V$  为拉速, m/min;  $2\alpha$  为夹辊与铸坯接触部分弧长所对应的角度,  $(^\circ)$ ;  $\epsilon$  为铸坯表面的黑度;  $\delta$  为 Stefan, Boltzmann 常数,  $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ ;  $T_0$  为环境温度,  $^\circ C$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 方坯二冷喷嘴布置方式优化

结合某方坯铸机具体情况进行分析,浇注断面为  $150\ mm \times 150\ mm$ ,该铸机二冷区分为四段,其中三段喷嘴布置间距为  $230 \sim 250\ mm$ 。在浇铸低碳钢过程中,出现脱方和内部裂纹等铸坯缺陷,严重地影响正常生产。由于该钢种为裂纹敏感性钢种,二冷段局部冷却不均匀,铸坯温度周期性回升会引起表面裂纹、中心裂纹。

对二冷段气水喷嘴进行测试,根据喷嘴布置间距将水流密度叠加处理,分析得到二冷段三段喷嘴布置间距过大,冷却不均匀,铸坯温度回升较大。其中,三段喷嘴布置间距为  $250\ mm$ ,在对喷嘴水流密度进行叠加后,如图 3 所示,发现两个喷嘴中间位置没有水滴覆盖,此种布置方式下中间位置冷却强度最小,而两边冷却强度相对较大,不利于铸坯均匀冷却;当将喷嘴布置间距为  $210\ mm$  时,水流密度整体上比较均匀,有利于铸坯的均匀冷却。

图 4 为喷嘴布置方式优化前后铸坯在二冷段三段处的铸坯表面温度仿真结果。其中曲线分别为二冷段优化前后铸坯表面温度。由曲线可以看出当二冷段三段喷嘴布置间距为  $250\ mm$  时,该段局部冷却强度过大,在距结晶器液面  $7\ m$  左右处铸坯表面温度最低,由于冷却不均匀,铸坯温度回升较大,最

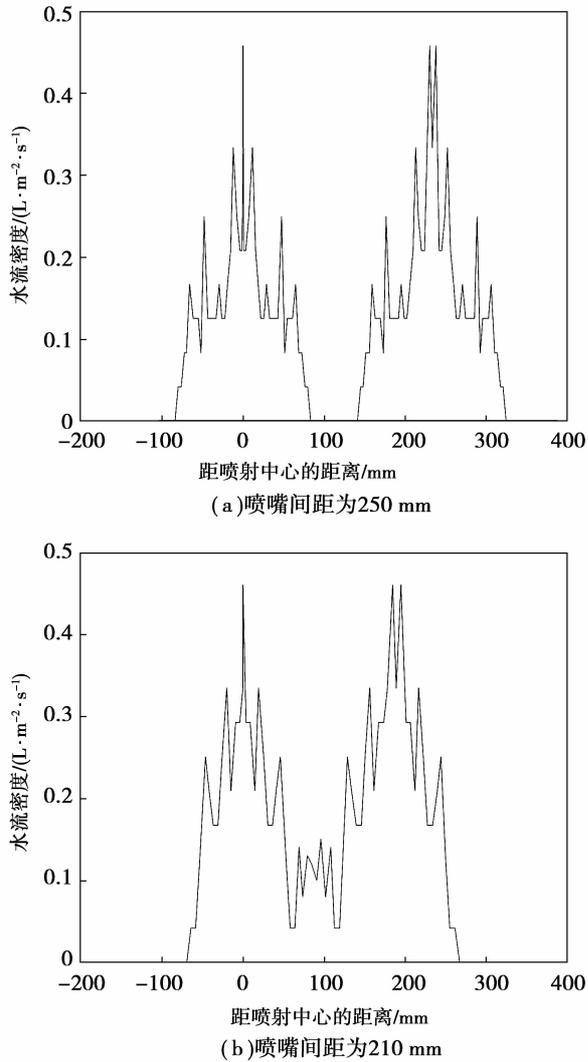


图 3 气水喷嘴水流密度分布

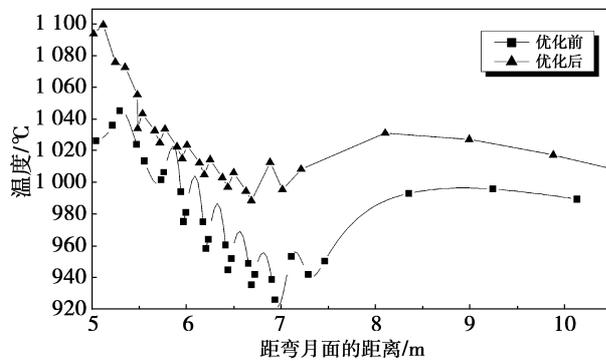


图 4 优化前后铸坯表面温度仿真结果

大处超过  $100\ ^\circ C/m$ ,使铸坯热应力集中产生表面裂纹;当喷嘴布置间距为  $210\ mm$  时,喷嘴水流密度分布比较均匀,铸坯表面温度能够均匀下降,铸坯温度有所回升,但回升温度值较小,对铸坯质量不会造成

较大影响<sup>[12-13]</sup>。

在铸坯二冷段进行温度测试,检验优化后的二冷制度是否满足实际铸坯冷却要求,根据二次冷却制度的制定原则,铸坯表面温度是否均匀下降,矫直点温度是否在合理的目标温度范围,使铸坯在矫直段避开低温脆性区<sup>[14-15]</sup>。在某方坯铸机的 4、5 流进行测试,测试采用 Raytek 系列 3I2ML3U 测温仪,测温范围为 200~1 800 °C,测量误差为±1 °C。测试位置选择在二冷区末端(至结晶器液面距离 8 m)和矫直点起始位置(至结晶器液面距离 14.3 m),测试结果和仿真结果如表 1 所示。在二冷区末端温度测试结果与仿真结果最大误差为 1.2%,矫直点温度测试结果与仿真结果最大误差为 1.6%,现场测试结果表明计算机仿真与实际浇注过程中铸坯温度相符,采用仿真方法可以对铸坯进行二冷喷嘴布置方式进行优化,为二冷制度优化提供理论依据。通过对低碳钢二冷段冷却水量、喷嘴布置方式优化调节前后的铸坯内部质量比较,结果表明对喷嘴布置方式进行调整以后,二冷比水量由 1.0 L/kg 调至 0.90 L/kg,过热度控制在 0~25 °C 之间时,铸坯在二冷段能够均匀冷却,在矫直点铸坯表面温度避开低温脆性区,铸坯内部质量明显得到改善。

表 1 现场测试结果与仿真结果对比

测试结果	二冷区末端温度		矫直点温度	
	测试/°C		测试/°C	
	内弧	侧面	内弧	侧面
4 流现场测试结果	1 030	1 175	954	1 014
5 流现场测试结果	1 032	1 186	957	1 010
仿真结果	1 024	1 190	970	1 003
最大误差/%	0.7	1.2	1.6	1.1

## 2.2 板坯二冷喷嘴布置方式优化

结合某板坯连铸机的情况进行分析,浇注断面为 170 mm×1 400 mm。在浇注过程中,铸坯中心特别是横向距离窄面 175 mm 处附近出现了偏析,严重影响铸坯内部质量。该板坯铸机二冷区分为十段,其中足辊段和零段侧面采用喷水冷却,之后侧面均采用空冷。一段至四段沿拉坯方向上每排 2 个喷嘴,喷嘴间距为 600 mm,为了分析铸坯出现质量问题的原因,对该铸机使用的喷嘴进行水流密度测试,根据测试结果分析其冷却均匀性。

根据铸坯横向水流密度分布情况,在拉速为 1.25 m/min 时仿真得到铸坯在凝固末端不同位置

的断面凝固形貌。考虑到铸坯横断面的对称性,仿真结果中只给出了铸坯横断面一半的温度仿真结果和凝固形貌。图 5 为拉坯方向上不同断面位置的铸坯横向内弧表面温度分布情况和断面凝固形貌,在距离弯月面为 8 704 mm 处,内弧表面温度在 1/4 位置(距离窄面 350 mm 处)明显下降较快,表明此处冷却强度过大。仿真结果表明在凝固末期,铸坯的凝固过程在断面方向上存在明显的不均匀性,铸坯 1/4 位置首先完全凝固,其次为铸坯中心位置,最后为铸坯 1/8 位置(距离窄面 175 mm 处)。由于铸坯断面在横向冷却的不均匀性,造成在凝固末端铸坯的断面中心线附近,特别是 1/8 位置出现严重偏析。

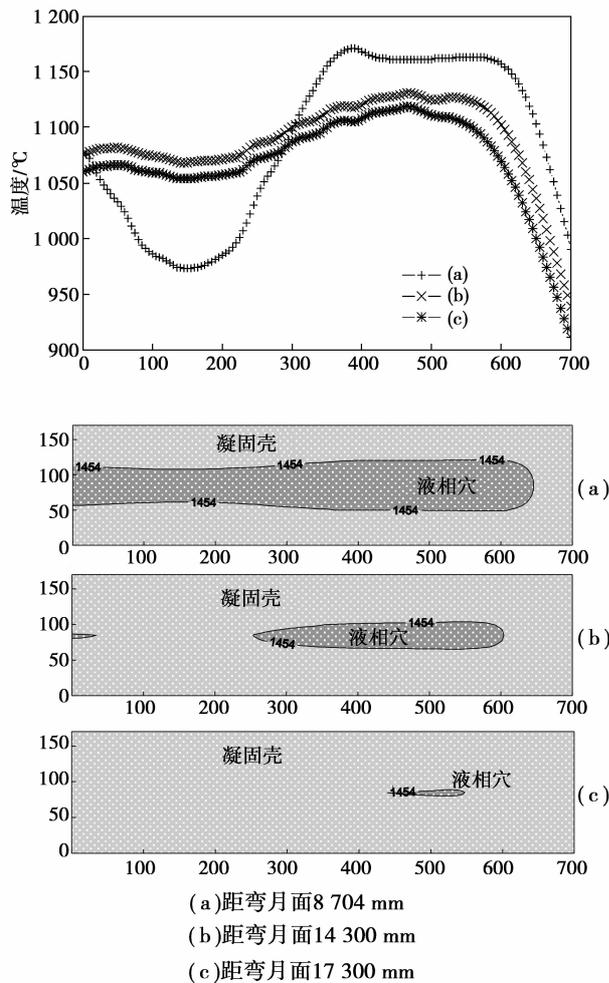


图 5 铸坯断面横向内弧表面温度分布情况和断面凝固形貌

图 6 为拉速 1.25 m/min 时,距离弯月面 13 669 mm 处铸坯断面不同位置(铸坯断面中心、1/4 位置和 1/8 位置)的射钉测试结果。测试结果表明铸坯射击位置已接近凝固末端,其中在断面中心和 1/4 处的射钉形貌没有变化,可以看到钉子的全

部形状,表明该位置已经完全凝固。在 1/8 处可以看到射钉末端出现物质扩散现象,表明该位置有少量液芯的存在。射钉测试结果表明,首先完全凝固的位置为铸坯断面的 1/4 位置处,随后为中心位置,最后凝固的位置为铸坯中心线的 1/8 位置处。由于二冷区该段水流密度在铸坯横断面上分布的不均匀,铸坯断面 1/4 位置处冷却强度最大,中心位置处次之,而 1/8 位置处冷却最弱。铸坯在凝固过程中局部冷却强度较大,造成铸坯局部凝固速度较快,在断面方向上坯壳厚度增长速度不均匀。为改善铸坯在二冷段在横断面方向水流密度分布的不均匀性,需要对二冷区喷嘴布置间距进行调整。

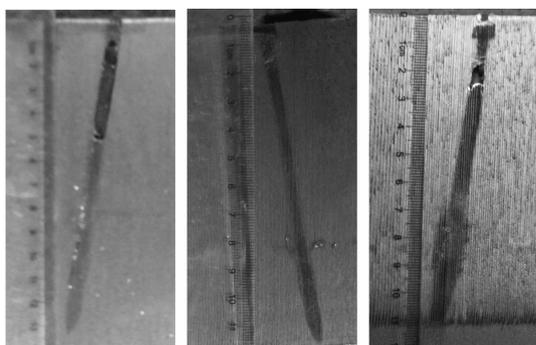


图 6 铸坯射钉测试结果

(左:1/2 位置;中:1/4 位置;右:1/8 位置)

图 7 为二冷区一至四段喷嘴布置方式优化前后的示意图,其中优化前每排喷嘴个数为 2 个,喷嘴布置间距为 600 mm,优化后每排喷嘴个数为 3 个,喷嘴布置间距为 475 mm,相邻两排中间位置的喷嘴间隔错位 60 mm。比较优化前后的喷嘴布置情况,增加喷嘴个数,减小喷嘴间距在一定程度上使断面横向水流密度分布均匀,同时从整体上也增大了二冷段的冷却强度。

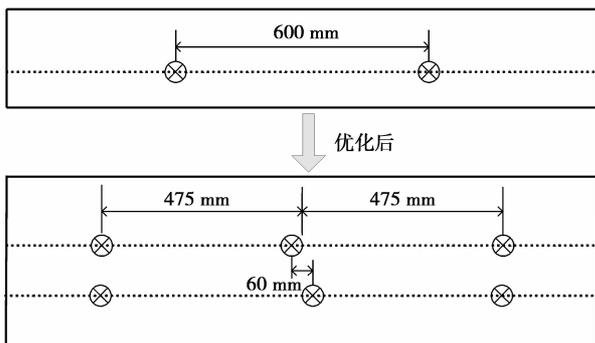


图 7 喷嘴布置方式优化示意图

图 8 为优化前后喷嘴在铸坯内弧宽面的水流密度分布情况。由测试结果可以看出,铸坯 1/4 位置(距离窄面 350 mm 处)水流密度最大,冷却强度最大,铸坯中心和角部水流密度较小,冷却强度较小。优化后局部水流密度过大的情况得到缓解,尤其是 1/4 位置,在铸坯横断面宽度方向上水流密度分布趋于均匀,同时由于喷嘴个数的增大,在铸坯断面方向上,整体的水流密度也有所增加。

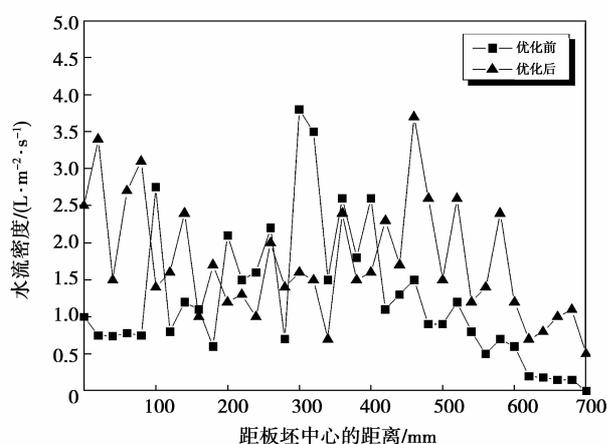


图 8 优化前后铸坯宽面水流密度分布情况

图 9 为喷嘴布置方式优化后不同位置的铸坯横向内弧表面温度分布情况和断面凝固形貌。在距离弯月面为 8704 mm 处,内弧表面温度在横断面方向上基本一致,角部温度由于二维传热作用,稍低于内弧表面中心温度,喷嘴布置方式优化后可以保证铸坯横断面方向上的均匀冷却。仿真结果表明在铸坯凝固末期,凝固前沿在断面方向上比较均匀,铸坯凝固过程中保持横断面方向上凝固速度基本一致,从而在一定程度上有效地避免了凝固末端发生的偏析现象。另外,二冷段整体冷却强度增大,钢液内各溶质在凝固过程中没有足够的时间析出,在一定程度上也减少了凝固偏析现象出现<sup>[16]</sup>。

图 10 为喷嘴布置方式优化前后铸坯内部质量对比,其中图(a)和图(b)分别为喷嘴布置方式优化前、优化后的铸坯断面内部质量照片。在喷嘴布置方式优化前,由于二冷段铸坯断面横向水流密度分布不均匀,在凝固末期,铸坯断面中心 1/8 位置出现严重偏析现象;喷嘴布置方式优化后,对二冷段喷嘴间距和喷嘴个数进行了调整,铸坯断面中心位置的偏析现象明显得到改善。

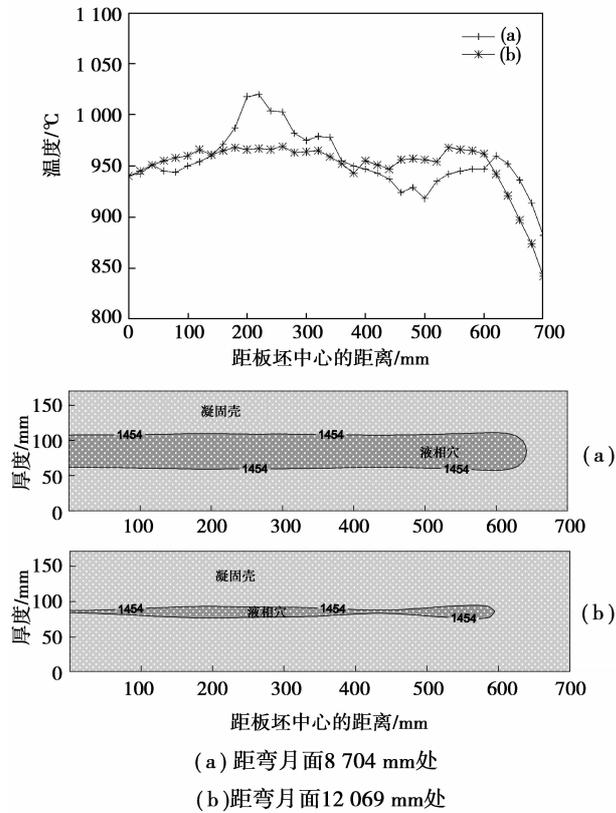


图 9 优化后铸坯断面横向内弧表面温度分布和断面凝固形貌

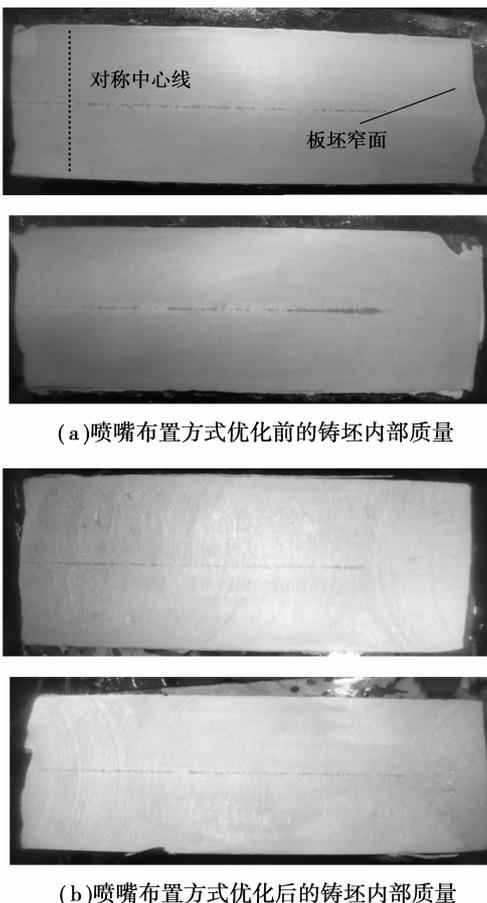


图 10 喷嘴布置方式优化前后铸坯内部质量对比

### 3 结 论

1) 采用喷嘴水流密度数值叠加的方法, 根据喷嘴布置优化的基本原则, 在拉坯方向和横断面方向上对连铸二冷段喷嘴布置方式进行优化, 使冷却水量在一定喷淋区域内保持均匀, 有利于铸坯均匀冷却。

2) 在铸坯横断面方向上, 考虑了横向水流密度分布的不均匀性对铸坯凝固过程的影响, 仿真得到拉坯方向上不同位置横断面的铸坯凝固形貌, 并将凝固形貌的模拟结果与射钉测试结果进行对比, 二者结果一致。

3) 根据布置优化原则对连铸喷嘴布置方式进行优化, 并对优化前后铸坯表面温度进行仿真和测温验证, 结果表明优化后在二冷区铸坯表面温度能够均匀下降, 在喷淋水区域内均匀冷却, 铸坯内部质量明显得到改善。

#### 参考文献:

[1] 靳星, 文光华, 唐萍, 等. 连铸二冷喷嘴喷雾特性测试系统开发 [J]. 钢铁(增刊), 2006, 41:279-282.  
JIN XING, WEN GUANG-HUA, TANG PING, et al. Development of system for the spraying characteristic test of secondary cooling nozzle in the continuous casting [J]. Iron and Steel (S2), 2006, 41:279-282.

[2] 严学春, 吴代平, 管序荣, 等. 板坯连铸机喷嘴的选配和布置 [J]. 炼钢, 2004, 20(6):56-60.  
YAN XUE-CHUN, WU DAI-PING, GUAN XU-RONG, et al. Selecting and arrangement of nozzles for continuous cast slab [J]. Steel Making, 2004, 20(6): 56-60.

[3] 齐彦峰, 文光华, 唐萍, 等. 二冷喷嘴类型和布置对板坯质量的影响 [J]. 特殊钢, 2004, 25(6):55-57.  
QI YAN-FENG, WEN GUANG-HUA, TANG PING, et al. Influence of secondary cooling nozzle shape and layout on quality of continuous casting slab [J]. Special Steel, 2004, 25(6):55-57.

[4] 乔兴武, 李雪兆. 连铸二冷喷淋喷嘴分布配置的研究 [J]. 冶金设备, 2009, 176(4): 22-25.  
QIAO XING-WU, LI XUE-ZHAO. Research for secondary cooling Spraying nozzle distributing configuration of continuous casting [J]. Metallurgical Equipment, 2009, 176(4): 22-25.

[5] RAMSTORFER F, ROLAND J, CHIMANI C, et al. Modeling of air-mist spray cooling heat transfer for continuous slab casting [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2009, 22 (1/4): 39-42.

(下转第 76 页)

- 187-199.
- [ 8 ] 李华清,谢水生,阎允杰,等.取向成像电子显微术试样的制备[J].理化检测,2004,40(12):612-616.  
LI HUA-QING, XIE SHUI-SHENG, YAN YUN-JIE, et al. Preparation of orientation imaging electron microscopy sample[J]. Physical and chemical testing, 2004, 40(12):612-616.
- [ 9 ] CHEN X H, LU J, LU L, et al. Tensile properties of a nanocrystalline 316L austenitic stainless steel [J]. Scripta Materialia, 2005, 52(10):1039-1044.
- [10] CAI M H, DING H, ZHANG J S. Transformation behavior of low carbon steels containing two different Si contents[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2009,16(2):55-60.
- [11] HUNTZ A M, BAGUE V, BEAUPLE G, et al. Effect of silicon on the oxidation resistance of 9% Cr steels[J]. Applied Surface Science, 2003, 207(1/4): 255-275.
- [12] YANG Y, YANG C, LIN S. Effects of Si and its content on the scale formation on hot-rolled steel strips[J]. Materials Chemistry and Physics, 2008, 112(2):566-571.
- [13] NAKAI M, NAGAI K, MURATA Y, et al. Improvement in steam oxidation resistance of Fe-10% Cr-0.08% C steel by suppressing hydrogen dissolution [J]. Corrosion Science, 2006, 48(11):3869-3885.
- [14] CALLIARI I, ZANESCO M, DABALÁ M, et al. Investigation of microstructure and properties of a Ni-Mo martensitic stainless steel [J]. Materials and Design, 2008, 29(1):246-250.
- [15] MACHADO I F. Technological advances in steels heat treatment [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 172(2):169-173.
- [16] MARSOT J, CLAUDON L, JACQMIN M. Assessment of knife sharpness by means of a cutting force measuring system [J]. Applied Ergonomics, 2007, 38(1):83-89.

(编辑 王维朗)

(上接第 59 页)

- [ 6 ] HARDIN R A, LIU K, BECKERMANN C, et al. A transient simulation and dynamic spray cooling control model for continuous steel casting [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2003, 34(3):297-306.
- [ 7 ] WENDELSTORF J, SPITZER K H, WENDELSRORF R. Spray water cooling heat transfer at high temperatures and liquid mass fluxes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(19/20): 4902-4910.
- [ 8 ] I HERNÁNDEZ C, F A ACOSTA G, A H CASTILLEJOS E, et al. The fluid dynamics of secondary cooling air-mist jets [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2008, 39(5): 746-763.
- [ 9 ] CHEN W, ZHANG Y Z, WANG B X. Optimization of continuous casting process parameters based on coupled heat and stress model[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2010, 37(2): 147-154.
- [10] HAUSER K, DITTENBERGER K, HAHN S, et al. Dynamic 3D heat transfer simulation of continuous casting [J]. International Journal of Cast Metals Research, 2009, 22(1/4): 115-118.
- [11] EI-BEALY M. Monotonic and fluctuated cooling approaches in secondary cooling zones during continuous casting [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1997, 36(1): 49-56.
- [12] GUO W, ZHU M Y. Characteristic parameters for dendritic microstructure of solidification during slab continuous casting [J]. Journal of Iron Steel Research, International, 2009, 16(1): 17-21.
- [13] HA J S, CHO J R, LEE B Y, et al. Numerical analysis of secondary cooling and bulging in the continuous casting of slabs [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113(1): 257-261.
- [14] CHEN W, ZHANG Y Z, WANG B X. Optimization of continuous casting process parameters based on coupled heat and stress model [J]. Ironmaking and Steelmaking, 2010, 37(2): 147-154.
- [15] 靳星,陈登福,王青峡,等.板坯连铸二冷喷嘴性能测试及其应用[J].过程工程学报,2008,8(z1):161-165.  
JIN XING, CHEN DENG-FU, WANG QING-XIA, et al. The testing of secondary cooling nozzle characteristics for slab continuous casting and its application [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(z1):161-165.
- [16] 仲博颖,王玲,张麦仓,等.冷却速度对Waspaloy合金凝固过程中偏析和液体密度的影响[J].北京科技大学学报,2008,30(7):760-764.  
ZHONG FU-YING, WANG LING, ZHANG MAI-CANG, et al. Effect of cooling rate on the segregation and liquid density of Waspaloy alloy during solidification process [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(7):760-764.

(编辑 王维朗)